 DOI: 10.22067/civil.v29i2.23158 

# ارزیابی تأثیر اجزای اتصال بر عملکرد پای ستون در ساختمان‌های فولادی★

«یادداشت پژوهشی»

جواد رزّاقی[(١)] آرش خوش‌بخت[(٢)]

**چکیده** *اتصال پای ستون یکی از مهم‌ترین اجزای ساختمان‌های فولادی می‌باشد که میزان گیرداری آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار واقعی سازه تحت بارهای ثقلی و جانبی و نتایج تحلیل سازه دارد. عوامل زیادی، ازجمله ضخامت کف ستون، تعداد، قطر و آرایش میل مهارها و نیز ابعاد سخت‌کننده‌ها، بر گیرداری اتصال پای ستون مؤثر می‌باشند. در تحقیق حاضر با انجام تحلیل‌های غیرخطی به‌روش اجزای محدود، به بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای یادشده بر عملکرد اتصال پای ستون پرداخته شده‌است. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود شامل رفتار لنگر-دوران پای ستون، محل تشکیل مفصل پلاستیک و نیز نحوهٔ گسترش و توسعهٔ تنش‌ها و تغییر شکل‌ها نشان می‌دهند که تغییر در مشخصات هر کدام از اجزای مختلف اتصال سبب تغییر در عملکرد و میزان گیرداری اتصال پای ستون، الگوی تسلیم کف ستون و میل-مهارها، تمرکز تنش موضعی در اجزای اتصال و نیز نحوهٔ توزیع تنش روی سطح بتن می‌شود. این آثار باتوجه به پارامترهای مؤثر در اتصال پای ستون، دسته‌بندی و ارائه گردیده‌اند.*

**واژه‌های کلیدی** گیرداری، اجزای محدود، اتصال پای ستون، سخت‌کننده، میل مهار.

## Effects of Connection Details on the Behavior of Column Base Connection

**J. Razzaghi** **A. Khoshbakht**

**Abstract** *Fixity of column base connection plays a major role in overall behavior of steel structures. Several parameters influence the real behavior of the column base connections, among them base plate thickness, anchor bolts and stiffeners details can be mentioned. A nonlinear three dimensional finite element method has been utilized for numerical studying of the behavior of the column base connection. Thickness of the base plate and stiffeners and also sizes and numbers of the anchor bolts were changed in a number of models to determine their effects on the nonlinear behavior of the regular column base connection. It was observed that column base connection characteristics such as its moment-rotation behavior, yielding pattern of base plate and anchor bolts and local stress concentration of the connection elements can be significantly affected by changing any detail of the connecting elements. The effects of each parameter on the behavior of column base connection were categorized and presented in this paper.*

**Key Words** Fixity, Finite Element, Column Base Connection, Stiffener, Anchor Bolt.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ٩٢/٤/٦ و تاریخ پذیرش آن ٩٣/١١/١ می‌باشد.

(١) نویسنده مسئول: استادیار گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

Email: javadr@guilan.ac.ir

(٢) کارشناس ارشد سازه، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان.

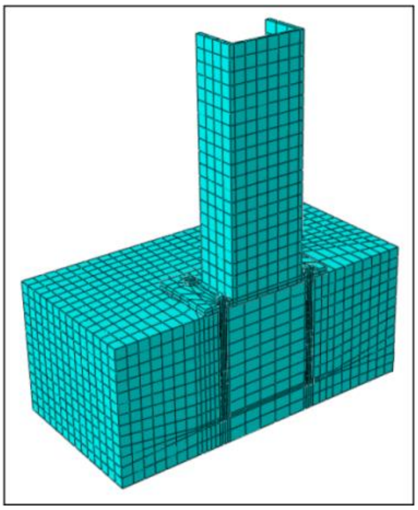
## مقدمه

اتصال پای ستون عملکرد نسبتاً پیچیده‌ای تحت بارهای وارد دارد. مطالعات انجام شده در زلزله‌های اخیر، بیانگر این مطلب بودند که بخشی از خرابی‌ها، ناشی از عملکرد نامطلوب اتصال پای ستون می‌باشد. به‌عنوان نمونه، گزارشهایی که از زلزلهٔ نورتریج توسط شورای فنی شریان‌های حیاتی مهندسی زلزله و نیز تیم شناسایی نورتریج ارائه شد [1]، بیانگر این بود که بسیاری از اتصالات پای ستونی طراحی‌شده براساس رهنمودهای موجود عملکرد رضایت‌بخشی نداشتند.

جاسپارت و وندگانز [2]، رفتار میل‌مهارهای با مهار انتهایی را در اتصال پای ستون مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که چسبندگی بین میل‌مهار و بتن پی به‌آسانی به‌ویژه در تغییرشکل‌های بزرگ اتصال و یا در تحریکات زلزله، از بین می‌رود به‌گونه‌ای که می‌توان میل‌مهار را از ابتدای بارگذاری فاقد چسبندگی با بتن فرض کرد. هاسل‌واندر و همکارانش [3] با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، نتیجه گرفتند که الگوهای خرابی ممکن میل‌مهار شامل تسلیم میل‌مهار به‌ویژه در بخش رزوه شده، متلاشی شدن پوشش بتن روی بخش مهاری میل‌مهار و تشکیل مخروط خرابی بتن می‌باشند. پیکارد و بیولی [4] و کانتولین و همکارانش [5] با انجام تحقیقات آزمایشگاهی، تأثیر بار محوری ستون بر صلبیت اتصال پای ستون را مورد بررسی قرار دادند. هان و ملچرز [6] تأثیر ابعاد ستون و ضخامت کف ستون در افزایش سختی اتصال مفصلی پای ستون را مورد مطالعه قرار دادند. ارموپولوس و استاتوپولوس [7] با درنظر گرفتن پارامترهایی ازقبیل اندازه و ضخامت صفحه کف ستون، طول و مکان میل مهارها و نیز بزرگی بار محوری، یک مدل ریاضی برای توصیف عملکرد اتصال پای ستون ارائه کردند. آستانه و همکارانش [8] نیز، با بررسی آزمایشگاهی اتصال پای ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای، توانایی اتصال پای ستون در اتلاف انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند.

## مدل‌سازی اجزای محدود

در مطالعهٔ حاضر، اتصال پای ستون با جزئیات رایج شامل ستون، کف ستون، میل‌مهارها و بتن پی بااستفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شد و مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی مادی و هندسی قرار گرفت. قیود تماسی مناسب برای توصیف بر هم کنش بین اجزا اعمال شدند. ضریب اصطکاک بین کف ستون و بتن پی، براساس آیین‌نامهٔ AISC [10]، ۰/۵۵ درنظر گرفته شد. براساس مطالعات انجام‌شده توسط جاسپارت و وندگانز [2]، که پیش‌تر بدان اشاره شد، فرض شده‌است هیچ‌گونه چسبندگی بین میل‌مهار و بتن پی وجود نداشته باشد. تمام اجزای اتصال با المان حجمی C3D8R، موجود در مجموعه المان‌های نرم‌افزار ABAQUS [9] شبکه‌بندی شدند (شکل ۱).

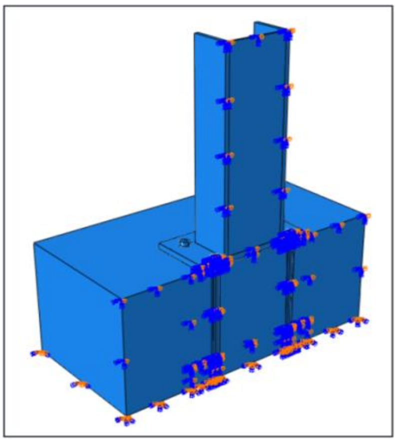


شکل ۱ مدل اجزای محدود شبکه‌بندی شده

تمام درجات آزادی در سطح زیرین بلوک بتنی مقید و وجوه کناری بلوک بتنی آزاد می‌باشند. بااستفاده از تقارن صرفاً نیمی از سازه مدل شد (شکل۲).

به‌منظور اعمال لنگر خمشی، یک بار جانبی یکنواخت به سطح فوقانی ستون و با گام‌هایی با طول معین وارد گردید. طبق مطالعات سالمون و همکارانش [11]، تأثیر نیروی برشی ایجادشده در پای ستون بر

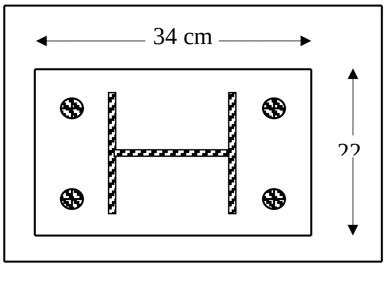
دوران و لنگر مقاوم نهایی اتصال ناچیز می‌باشد. تنش تسلیم و نهایی ورق، به‌ترتیب ۲٤۰۰ و ۳۸۰۰ و برای میل‌مهار، به‌ترتیب ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ و مدول الاستیسیته فولاد $2/1\times10^{6}$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع درنظر گرفته‌شد. رفتار بتن تا تنش حد نسبی الاستیک بود و تنش حد نسبی مطابق آیین‌نامهٔ ACI 318-08، معادل ۰/٤۵ $f'_c$ لحاظ شد [12]. مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری مشخصهٔ بتن، به‌ترتیب ۲/۲x۱۰۵ و ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و کرنش نهایی و ضریب پوآسون بتن به‌ترتیب ۰/۰۰۲۲ و ۰/۱۵. درنظر گرفته‌شد.



شکل ۲ شرایط مرزی مدل

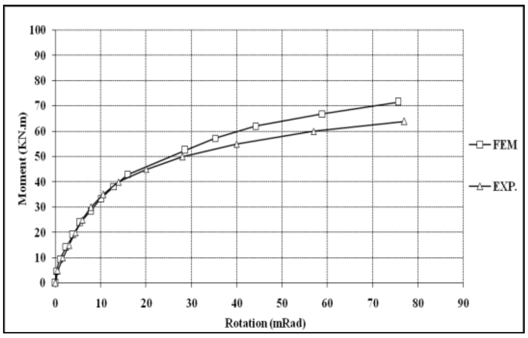
## صحت‌سنجی مدل‌های عددی

به‌منظور اطمینان از صحت تحلیل‌ها، مدل آزمایشگاهی اتصال پای ستون که توسط جاسپارت و وندگانز ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌بود [2]، بااستفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مدل‌سازی شد. شکل (۳) اتصال پای ستون مورد نظر را نشان می‌دهد.




شکل ۳ پیکربندی اتصال پای ستون [2]

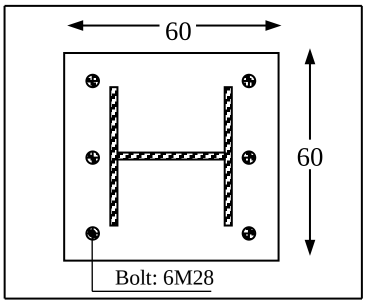
بارگذاری به‌صورت اعمال یک بار قائم به‌اندازهٔ ۱۰۰ کیلونیوتن و سپس اعمال بار جانبی به بالای ستون تا مرحلهٔ خرابی می‌باشد. شکل (٤) منحنی لنگر-دوران حاصل از آزمایش تجربی و مدل‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد. علی‌رغم عدم دسترسی به پاره‌ای از مشخصات، نمودارها بیانگر انطباق مناسب نتایج مدل‌سازی اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی می‌باشد. هم‌چنین، مکانیزم خرابی در این آزمایش، خرابی کف ستون بیان شده‌بود که نتایج مدل‌سازی اجزای محدود نیز مؤید این مطلب می‌باشد.




شکل ٤ منحنی لنگر-دوران مدل تجربی و اجزای محدود

## بررسی مدل‌های اجزای محدود

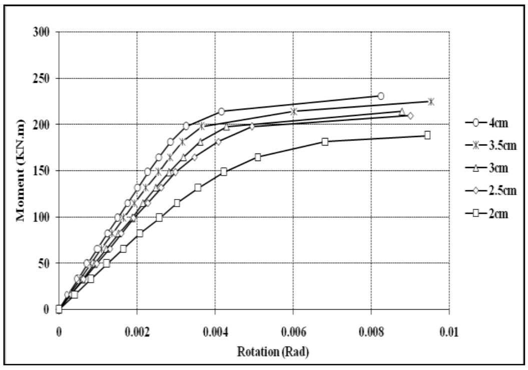
در مجموع ۱٦ مدل سه‌بعدی اجزای محدود در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای این مدل‌سازی‌ها ضخامت کف ستون، تعداد و قطر میل‌مهارها و نیز ابعاد سخت‌کننده‌ها می‌باشند که بسته به مورد، تغییرات مورد نظر برروی مدل مبنا (.Ref) اعمال شد. مدل مبنا، شامل یک اتصال پای ستون با ورق کف ستون مربعی به ابعاد ٦۰ و ضخامت ۳ سانتی‌متر می‌باشد. میل‌مهارها ٦ عدد به قطر ۲/۸ و به طول ۵۰ سانتی‌متر و از نوع میل‌مهار با مهرهٔ انتهایی است. ستون متصل به کف ستون، تیر ورقی با ابعاد بال و جان به‌ترتیب ٤۰x۲ و ۳۰x۲ سانتی‌متر و با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شد. این مجموعه برروی یک پی بتنی مربعی به ابعاد ۱٤۰ سانتی‌متر و عمق ٦۰ سانتی‌متر قرار گرفته‌است (شکل ۵).




شکل ۵ پیکربندی اتصال پای ستون مبنا (.Ref)

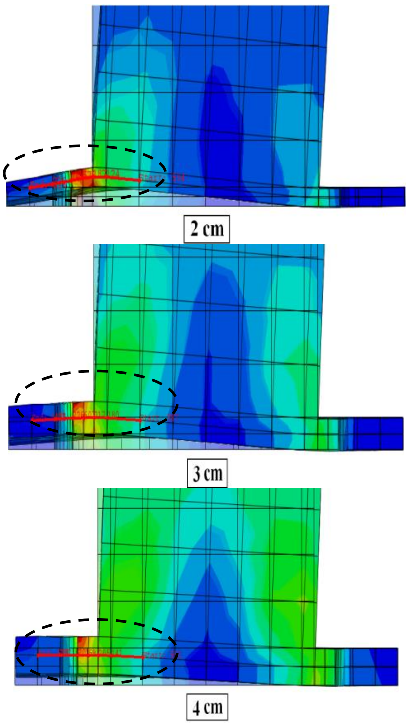
## ضخامت کف ستون

برای بررسی تأثیر ضخامت کف ستون بر پاره‌ای از ویژگی‌های اتصال در مجموع ۵ ضخامت مختلف کف ستون، که عبارتند از ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ٤ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شد. سایر مشخصات مانند مدل مبنا می‌باشد. در شکل (٦)، نمودار لنگر–دوران مربوط به حالات مختلف ارائه شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش ضخامت کف ستون، سبب افزایش محسوس در سختی و ظرفیت خمشی اتصال می‌گردد.



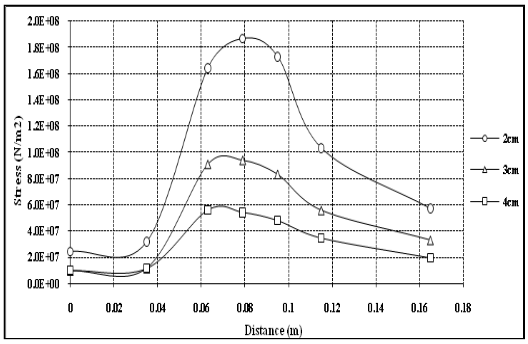

شکل ٦ نمودار لنگر–دوران ضخامت‌های مختلف کف ستون

ملاحظه می‌شود که در حالت ضخامت ۲ سانتی‌متر، به‌دلیل تسلیم زودهنگام نواحی‌ای از کف ستون در سمت کششی اتصال، انتهای سمت چپ کف ستون در تماس با بتن قرار می‌گیرد که سبب ایجاد نیروی اهرمی می‌شود (شکل ۷). نیروی اهرمی سبب تشدید تنش و تسریع فرآیند تسلیم ورق می‌شود. این نیرو در ضخامت‌های بالاتر ورق مشاهده نمی‌گردد. لذا، باافزایش ضخامت کف ستون به ۲/۵ سانتی‌متر، افزایش چشم‌گیر سختی و ظرفیت خمشی اتصال در نمودارها دیده می‌شود.



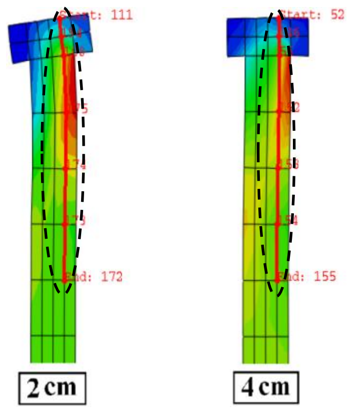

شکل ۷ نحوهٔ تغییر شکل کف ستون در ضخامت‌های مختلف کف ستون (تحت لنگر خمشی ۱۰۰ kN.m)

شکل (۸) نمودار تنش ایجادشده در کف ستون را در امتدادی معین در ناحیهٔ مشخص‌شده با خط‌چین در شکل (۷) نشان می‌دهد. در کف ستون با ضخامت ۲ سانتی‌متر تمرکز تنش شدیدی در محل اتصال ستون ایجاد می‌شود. باافزایش ضخامت ورق، تنش این ناحیه به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد به‌نحوی که باافزایش ضخامت به ۳ سانتی‌متر، تنش مذکور به نصف تقلیل می‌یابد. علاوه بر این، بررسی نتایج تحلیل‌ها بیانگر این نکته بود که تغییرشکل صفحات کم‌ضخامت، سبب تغییر شکل موضعی میل‌مهار در زیر مهرهٔ فوقانی آن و درنتیجه، ایجاد تنش موضعی در این ناحیه می‌شود.



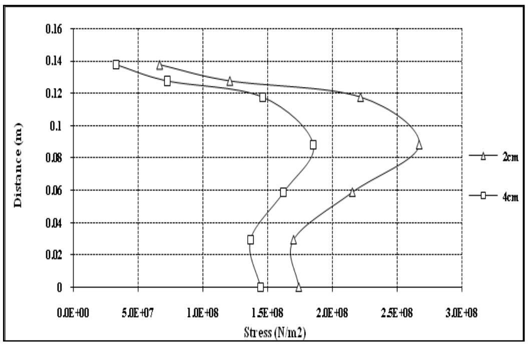

شکل ۸ نمودار تنش در ناحیهٔ مشخص‌شده برای ضخامت‌های مختلف کف ستون

در شکل (۹) وضعیت میل‌مهار تحت لنگر وارد نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت ورق از میزان تنش موضعی در این ناحیه کاسته می‌شود.




شکل ۹ تغییر تمرکز تنش زیر مهره میل‌مهار در ضخامت‌های مختلف کف ستون (تحت لنگر خمشی kN.m ۱۰۰)

شکل (۱۰) نمودار تنش ایجادشده را در امتداد مشخص‌شده در شکل (۹) تحت لنگر خمشی مذکور، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت کف ستون با ضخامت ۲ سانتی‌متر، تمرکز تنش شدیدی در ناحیهٔ زیرمهرهٔ فوقانی میل‌مهار ایجاد می‌شود که با افزایش ضخامت کف ستون، از میزان آن به‌طور محسوسی کاسته می‌شود.




شکل ۱۰ نمودار تنش در ناحیهٔ مشخص‌شدهٔ میل‌مهار برای ضخامت‌های مختلف کف ستون

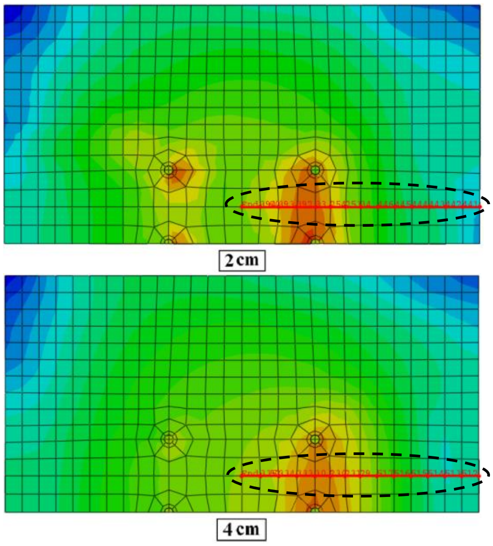
در جدول (۱)، ویژگی‌های اصلی اتصال شامل سختی اولیه و ظرفیت خمشی به‌طور خلاصه ذکر شده‌است.

جدول ۱ تأثیر ضخامت کف ستون بر سختی و ظرفیت خمشی

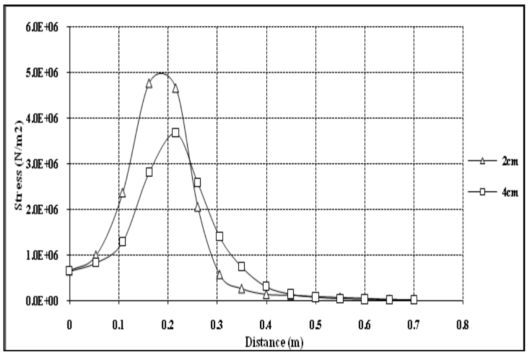
| ویژگی اتصال | 2 cm | 2.5 cm | 3 cm | 3.5 cm | 4 cm |
|---|---|---|---|---|---|
| سختی اولیه (kN.m/rad) | 38275 | 50640 | 53267 | 58662 | 64897 |
| ظرفیت خمشی (kN.m) | 190 | 210 | 215 | 225 | 230 |

با افزایش ضخامت کف ستون، از میزان تغییر شکل این صفحات کاسته می‌شود و عملکرد آنها صلب‌تر می‌شوند. متعاقباً، تمرکز تنش فشاری روی سطح بتن، به‌تدریج از ناحیه‌ای نزدیک زیر بال ستون به‌سمت ناحیه‌ای در اطراف لبهٔ کف ستون منتقل می‌شود. (شکل ۱۱).

در شکل (۱۲) نمودار تنش ایجادشده روی سطح بتن در ناحیهٔ مشخص‌شده در شکل (۱۱) نمایش داده شده‌است. با افزایش ضخامت کف ستون، محل برآیند تنش فشاری ایجادشده روی سطح بتن، به‌سمت لبهٔ کف ستون متمایل می‌شود و با افزایش بازوی لنگر زیر کف ستون، مقدار تنش فشاری روی سطح بتن و نیز، نیروی کششی ایجادشده در میل‌مهارها، برای تحمل یک لنگر خمشی مشخص، کاهش می‌یابد.




شکل ۱۱  تغییر توزیع تنش روی سطح بتن با افزایش ضخامت کف ستون (تحت لنگر خمشی ۱۰۰ kN.m)



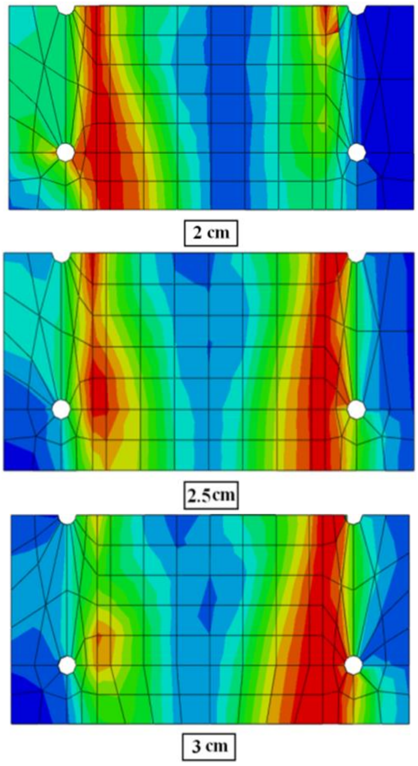

شکل ۱۲  نمودار تنش در امتداد ناحیهٔ مشخص‌شده روی بتن برای ضخامت‌های مختلف کف ستون

نیروی کششی ایجادشده در میل‌مهارها تحت لنگر خمشی مذکور، در جدول (۲) ارائه شده‌است.

جدول ۲  تأثیر ضخامت کف ستون بر نیروی کششی در میل‌مهارها (برای لنگر خمشی معادل ۱۰۰ kN.m)

| ضخامت کف ستون | 2 cm | 2.5 cm | 3 cm | 3.5 cm | 4 cm |
|---|---|---|---|---|---|
| نیروی میل‌مهارها (kN) | 274.6 | 262.0 | 260.4 | 258.7 | 255.3 |

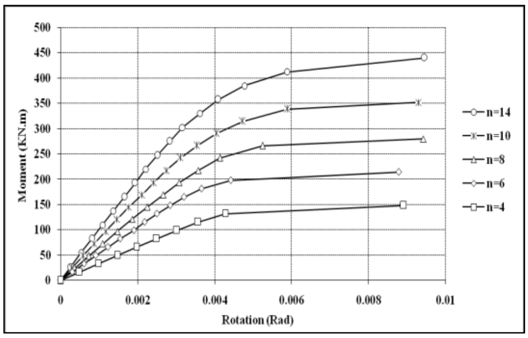
با افزایش ضخامت کف ستون، تا حدودی از نیروی ایجادشده در میل‌مهارها کاسته می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت کف ستون، شروع خرابی‌ها به‌تدریج از ناحیهٔ کششی کف ستون به ناحیهٔ فشاری آن منتقل می‌شود به‌گونه‌ای که مطابق شکل (۱۳) در حالت کف ستون با ضخامت ۲ سانتی‌متر، ابتدا سمت کششی کف ستون تسلیم می‌شود. این امر در ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر، تقریباً به‌طور همزمان در دو سمت اتصال و در ضخامت‌های بالاتر، صرفاً در سمت فشاری کف ستون رخ می‌دهد.




شکل ۱۳  الگوی تسلیم کف ستون در ضخامت‌های مختلف

## تعداد و قطر میل‌مهار

در مجموع ۵ سری مدل‌سازی به‌منظور بررسی تأثیر تعداد میل‌مهارها بر عملکرد اتصال پای ستون صورت گرفت. در این مدل‌ها به‌ترتیب ٤، ٦، ٨، ١٠ و ١٤ میل‌مهار با قطر ٢/٨ سانتی‌متر در اتصال پای ستون تعبیه شده‌است. در شکل (١٤) نمودار لنگر-دوران اتصال در هر مورد نمایش داده شده‌است.



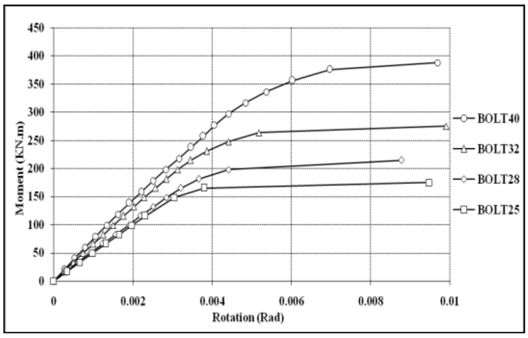

شکل ۱٤  نمودار لنگر-دوران برای تعداد مختلف میل‌مهار

تأثیر تعداد میل‌مهار بر سختی و ظرفیت خمشی اتصال در جدول (۳) ارائه شده‌است.

جدول ۳  تأثیر تعداد میل‌مهار بر سختی و ظرفیت خمشی

| ویژگی اتصال | 4-Bolt | 6-Bolt | 8-Bolt | 10-Bolt | 14-Bolt |
|---|---|---|---|---|---|
| سختی اولیه (kN.m/rad) | 32835 | 53267 | 64448 | 80427 | 97956 |
| ظرفیت خمشی (kN.m) | 150 | 215 | 280 | 355 | 440 |

به‌منظور بررسی تأثیر قطر میل‌مهارها بر عملکرد اتصال پای ستون، میل‌مهارهایی با قطر ۲/۵، ۲/۸، ۳/۲ و ٤ سانتی‌متر مدل‌سازی شدند. در شکل (۱۵) نمودار لنگر-دوران مربوط به هر مورد آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش قطر میل‌مهارها، به‌شدت برروی سختی و ظرفیت خمشی اتصال مؤثر می‌باشد. جدول (٤) تأثیر افزایش قطر میل‌مهار بر سختی اولیه و ظرفیت خمشی اتصال را نشان می‌دهد.

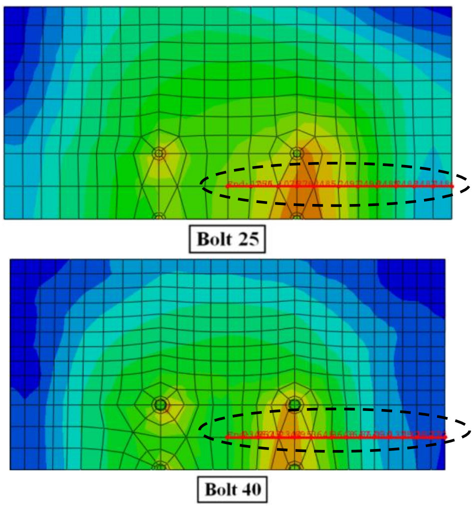



شکل ۱۵  نمودار لنگر-دوران برای ابعاد مختلف میل‌مهار

جدول ٤  تأثیر قطر میل‌مهار بر سختی و ظرفیت خمشی

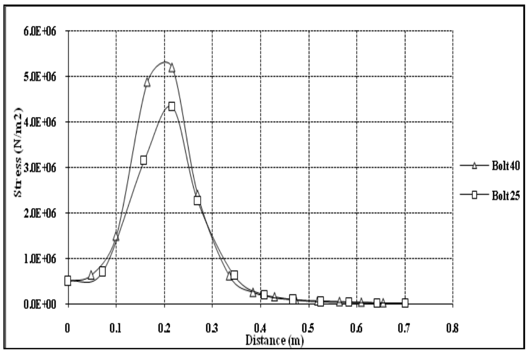
| ویژگی اتصال | Bolt25 | Bolt28 | Bolt32 | Bolt40 |
|---|---|---|---|---|
| سختی اولیه (kN.m/rad) | 49338 | 53267 | 64973 | 80427 |
| ظرفیت خمشی (kN.m) | 175 | 215 | 275 | 390 |

بررسی توزیع تنش روی سطح بتن، بیانگر این نکته بود که درصورت استفاده از میل‌مهارها با قطر و یا تعداد کمتر، به‌دلیل تغییر طول بیشتر میل‌مهار در سمت کششی، کف ستون مانند ورق صلب دوران می‌کند. این امر سبب می‌شود ناحیهٔ اتکایی بین کف ستون و بتن در سمت فشاری به لبهٔ کف ستون نزدیک‌تر شود. در این شرایط انتظار می‌رود با افزایش بازوی لنگر، برای تحمل یک لنگر خمشی ثابت، میزان نیروی کششی میل‌مهار و نیز نیروی فشاری زیر کف ستون کاهش یابد. شکل (۱٦) نمونه‌ای از توزیع تنش روی سطح بتن، برای دو قطر مختلف میل‌مهار را نشان می‌دهد.




شکل ۱٦  توزیع تنش روی سطح بتن با افزایش قطر میل‌مهار

شکل (۱۷) نمودار تنش ایجادشده روی سطح بتن را در امتداد ناحیهٔ مشخص‌شده در شکل (۱٦) نمایش می‌دهد. هم‌چنین در جدول (۵)، مقایسه‌ای بین نیروی کششی ایجادشده در میل‌مهارها، متناظر با افزایش قطر آنها انجام شده‌است.



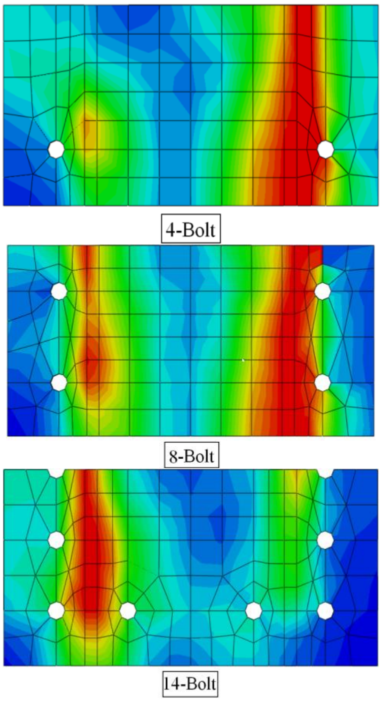

شکل ۱۷ نمودار تنش در امتداد ناحیهٔ مشخص‌شده روی بتن برای قطرهای مختلف میل‌مهار

جدول ۵ تأثیر قطر میل‌مهار بر نیروی کششی در میل‌مهارها (برای لنگر خمشی معادل ۱۰۰ kN.m)

| قطر میل‌مهار (mm) | Bolt25 | Bolt28 | Bolt32 | Bolt40 |
|---|---|---|---|---|
| نیروی میل‌مهارها (kN) | 248.5 | 260.4 | 271.4 | 279.2 |

بررسی روند تسلیم کف ستون با افزایش تعداد میل‌مهارها، نشان می‌دهد که با افزایش آنها، شروع خرابی کف ستون به‌تدریج از سمت فشاری به سمت کششی منتقل می‌شود. مطابق شکل (۱۸) در حالت استفاده از ٤ میل‌مهار، افزایش طول زیاد میل‌مهارها سبب تغییرشکل بزرگ ورق در سمت فشاری آن و درنتیجه، وقوع تسلیم در این ناحیه می‌گردد. با افزایش تعداد میل‌مهارها به ۸ عدد، خرابی‌هایی در سمت کششی نیز رخ می‌دهد و درنهایت در حالت استفاده از ١٤ عدد میل‌مهار، خرابی ورق از سمت کششی آن آغاز می‌گردد.

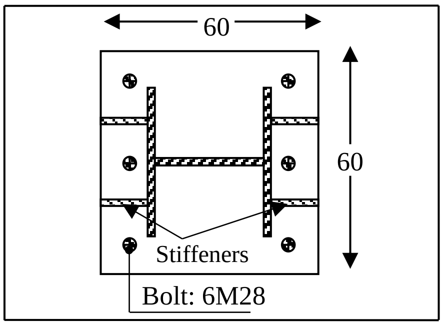
همچنین مشاهده شد در اتصالات با قطر و یا تعداد میل‌مهار زیاد نیز، تمرکز تنشی مطابق آنچه در شکل (۹) مشاهده می‌شود، به‌وجود می‌آید. لذا می‌باید توجه ویژه‌ای در هنگام انتخاب ضخامت کف ستون و تعداد و قطر میل‌مهارها، به این مسئله معطوف شود تا از خرابی موضعی میل‌مهار در این ناحیه جلوگیری شود.




شکل ۱۸ تغییر الگوی تسلیم کف ستون در تعداد میل‌مهارهای مختلف

## ابعاد سخت‌کننده

به‌منظور بررسی تأثیر سخت‌کننده‌ها، ٤ سخت‌کننده با ضخامت و ارتفاع‌های مختلف در اتصال مبنا تعبیه شد. این سخت‌کننده‌ها به ضخامت‌های ۱ و ۲ و ارتفاع‌های ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر درنظر گرفته‌شدند ( شکل ۱۹).




شکل ۱۹ آرایش سخت‌کننده‌ها در اتصال پای ستون

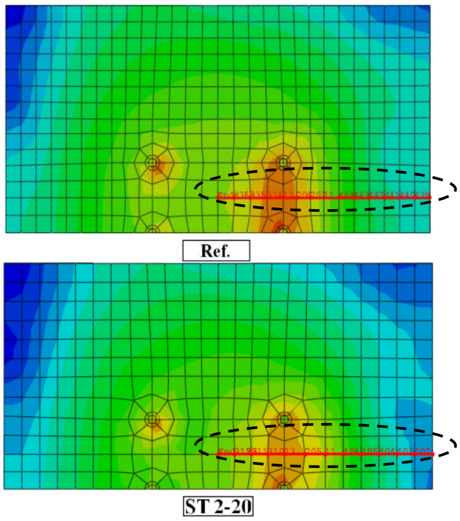
نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده سبب افزایش سختی و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود، با

افزایش ارتفاع سخت‌کننده‌ها، مقادیر پارامترهای فوق افزایش نسبتاً محسوسی می‌یابند ولی افزایش ضخامت، تفاوت چندانی به‌وجود نمی‌آورد ( جدول ٦).

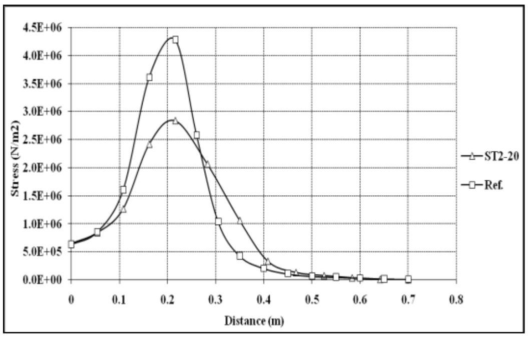
جدول ٦ تأثیر سخت‌کننده بر سختی و ظرفیت خمشی

| ویژگی اتصال | Ref. | ST1-10 | ST2-10 | ST1-20 | ST2-20 |
|---|---|---|---|---|---|
| سختی اولیه (kN.m/rad) | 53267 | 59370 | 60022 | 62962 | 64752 |
| ظرفیت لنگر (kN.m) | 215 | 220 | 222 | 230 | 233 |

بررسی توزیع تنش روی سطح بتن، حاکی از این مطلب بود که درصورت استفاده از سخت‌کننده، محل برآیند تنش ایجادشده روی بتن، به‌سمت لبهٔ کف ستون متمایل می‌شود و در عین حال از مقدار آن نیز کاسته می‌شود. با این وجود، میزان تنش در امتداد لبهٔ کف ستون افزایش می‌یابد. این امر، احتمال متلاشی شدن بتن در این ناحیه را افزایش می‌دهد. لذا لازم است در هنگام طراحی، این امر مدنظر قرار گیرد. در اشکال (۲۰) و (۲۱) به‌ترتیب، توزیع تنش روی سطح بتن و نمودار تنش مربوطه ارائه شده‌است.




شکل ۲۰ تغییر توزیع تنش روی سطح بتن درصورت استفاده از سخت‌کننده (تحت لنگر خمشی ۱۰۰ kN.m)




شکل ۲۱ نمودار تنش در امتداد ناحیهٔ مشخص‌شده روی بتن برای حالات با و بدون سخت‌کننده

در جدول (۷) مقایسه‌ای بین نیروی کششی میل‌مهارها ارائه شده‌است که بیانگر کاهش نه چندان قابل توجه نیروی میل‌مهارها درصورت استفاده از سخت‌کننده می‌باشد.

جدول ۷ تأثیر سخت‌کننده بر نیروی کششی در میل‌مهارها (برای لنگر خمشی معادل ۱۰۰ kN.m)

| نوع سخت‌کننده | Ref. | ST1-10 | ST2-10 | ST1-20 | ST2-20 |
|---|---|---|---|---|---|
| نیروی میل‌مهارها (kN) | 260.4 | 253.9 | 252.5 | 244.1 | 243.2 |

## نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات پارامتریک صورت گرفته بر روی اتصال پای ستون به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱. مطالعات صورت‌گرفته برروی تأثیر ضخامت کف ستون و نیز تعداد و قطر میل‌مهارها، بیانگر تأثیر چشم‌گیر آنها بر عملکرد اتصال پای ستون می‌باشد به‌گونه‌ای که افزایش پارامترهای مذکور، سبب افزایش محسوس سختی و ظرفیت خمشی اتصال می‌گردد.

۲. در ورق به ضخامت ۲ سانتی‌متر، تمرکز تنش شدیدی در محل اتصال ستون به‌وجود آمده‌است که سبب تغییر شکل موضعی کف ستون و ایجاد نیروی اهرمی می‌شود. این نیرو، در ضخامت‌های بالاتر کف

ستون مشاهده نمی‌شود. با افزایش ضخامت ورق، سختی و ظرفیت خمشی اتصال شدیداً افزایش می‌یابد.

۳. با تغییر ضخامت ورق، تعداد و قطر میل‌مهارها و هم‌چنین استفاده از سخت‌کننده، محل برآیند نیروی فشاری زیر کف ستون تغییر می‌کند. با افزایش تعداد یا قطر میل‌مهارها و یا کاهش ضخامت کف ستون، به‌علت کاهش بازوی لنگر، مقدار نیروی فشاری زیر کف ستون و نیز نیروی کششی میل‌مهارها افزایش می‌یابد.

٤. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مساحت میل‌مهارها و یا کاهش ضخامت کف ستون، سبب تمرکز تنش موضعی در زیر مهرهٔ فوقانی میل‌مهار می‌شود. لذا در هنگام انتخاب ضخامت ورق و مساحت میل‌مهارها، توجه به این موضوع برای جلوگیری از بروز خرابی موضعی در این ناحیه لازم است.

۵. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده سبب افزایش سختی و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود تأثیر افزایش ارتفاع سخت‌کننده‌ها بر پارامترهای فوق، بیشتر از تأثیر افزایش ضخامت می‌باشد.

٦. افزایش صلبیت کف ستون، سبب کاهش حداکثر تنش فشاری زیر کف ستون ولی افزایش تنش فشاری در امتداد لبهٔ ورق می‌شود. این امر، احتمال متلاشی شدن بتن در این ناحیه را افزایش می‌شود و لازم است که توجه ویژه‌ای به این امر معطوف شود.

## مراجع


1. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Northridge Earthquake–Lifeline Performance and Post-Earthquake Response, Monograph No. 8, ASCE, New York, New York, (1995).
2. Jaspart, J. P. and Vandegans, D., "Application of Component Method to Column Bases", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 48, pp. 89-106, (1998).
3. Hasselwander, G. B., Jirsa, J.O., Breen, J.E., and Lo, K., "Strength and Behavior of Anchor Bolts Embedded Near Edges of Concrete Piers", Research Report 29-2F, Center for Highway Research, University of Texas at Austin, (1977).
4. Picard, A. and Beaulieu, D., "Behavior of a Simple Column Base Connection", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 126-136, (1985).
5. Kontoleon, M.J., Mistakidis, E.S., Baniotopoulos, C.C., and Panagiotopoulos, P.D., "Parametric Analysis of the Structural Response of Steel Base Connections", *Computers and Structures*, Vol. 71, pp. 87-103, (1999).
6. Hon, K.K. and Melchers, R.E., "Experimental Behavior of Steel Column Bases", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 9, Paper No. 143, pp. 35-50, (1988).
7. Ermopoulos, J. and Stamatopoulos, G., "Mathematical Modeling of Column Base Plate Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 36, No. 2, pp. 79-100, (1996a).
8. Astaneh, A., Bergsma, G., and Shen J. H., "Behavior and Design of Base Plates for Gravity, Wind and Seismic Loads", *Proceedings of the National Steel Construction Conference*, Las Vegas, Nevada, AISC, Chicago, Illinois, (1992).

9. ABAQUS user's manual, Version 6.9.1 USA, (2009).
10. American Institute of Steel Construction, 13th Ed., Manual of Steel Construction, Chicago, IL, (2006).
11. Salmon, C. G., Shaker, L., and Johnston, B. G., "Moment-Rotation Characteristics of Column Anchorages", *Transactions*, ASCE, Vol. 122, pp. 132-154, (1957).
12. American Concrete Institute (ACI), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI, Farmington Hills, Michigan, (2008).